

## Cadena de Trazabilidad Digital para Medidas de Intensidad de Corriente en Corriente Alterna

D. Peral<sup>(1)</sup>, J. Díaz de Aguilar<sup>(1)</sup>, Y. Álvarez<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Centro Español de Metrología (CEM), C\ Alfar 2, 28760 Tres Cantos, Madrid  
dperal@cem.es

**RESUMEN:** En este artículo se presenta un método para trazar la corriente alterna en ac al SI basado en digitalizadores de alta gama. Al contrario que en los tradicionales métodos térmicos, el método propuesto utiliza una trazabilidad directa a formas de ondas cuánticas mediante el uso de sistemas de tensión Josephson. Esto permite no solo una simplificación en la cadena de calibración y tiempos de medida más cortos, si no que ofrece potencialmente el análisis del contenido espectral de las ondas de corriente, característica que no es posible con los tradicionales métodos térmicos. El escalado de corriente se consigue mediante el uso de shunts de corriente. El método sería aplicable a un rango de frecuencias de hasta 1 kHz. Además en este artículo se investiga el uso de ondas de calibración multitono para el análisis del contenido espectral y una mayor reducción del tiempo de calibración y se validan los resultados de la escalación de forma independiente, utilizando un voltímetro cuántico.

### 1. INTRODUCCIÓN

La actual definición del amperio del Sistema Internacional de unidades (SI), establecida en mayo de 2019, está basada en la asignación de un valor exacto a la carga del electrón, flujo de electrones en la unidad de tiempo. Esta nueva definición es, por tanto, válida para corriente continua (dc) como para corriente alterna (ac). El nuevo SI también asigna un valor exacto a la constante de Planck, lo que supone que las constantes asociadas a los efectos Josephson y Hall cuántico tengan valores exactos, siendo la realización de la tensión y la resistencia basada en dichos efectos directamente trazables al SI.

Aunque la realización de la corriente alterna basada en convertidores térmicos, utilizada por la mayoría de los laboratorios nacionales de metrología (INMs) durante más de 60 años, permite obtener exactitudes del orden  $0,1 \mu\text{V/V}$  esta se limita a proporcionar valores cuadráticos medios no siendo válidas para medidas dinámicas.

La introducción de una nueva escala de trazabilidad utilizando instrumentos digitales (digitalizadores), directamente trazables al SI, permitiría la medición dinámica de las formas de onda de corriente y voltaje, que son las condiciones reales de los instrumentos en la industria y que supondría una gran ventaja en muchos sectores, por ejemplo en potencia y energía, sanidad, sensores, instrumentación y fabricación avanzada, este ha sido el principal objetivo del proyecto 17RPT03 DIG-AC.

Para ello es necesario establecer una cadena de trazabilidad desde las unidades del SI hasta los equipos de medición eléctrica dinámicos digitales, con métodos, equipos y algoritmos de medición adecuados. Esta cadena de trazabilidad debe ser validada y, finalmente, debe permitir la transformación de medidas de tensión y corriente de analógicas a digitales, no solo para señales de onda sinusoidal pura, sino también para señales más complejas (o dinámicas) [1].

El Centro Español de Metrología (CEM), dentro de las actividades del proyecto, ha desarrollado el equivalente digital de intensidades en ac, basadas en shunts y convertidores térmicos, obteniendo un conjunto completo de calibraciones shunt-digitalizador en intensidades de corriente de hasta 1 A [2].

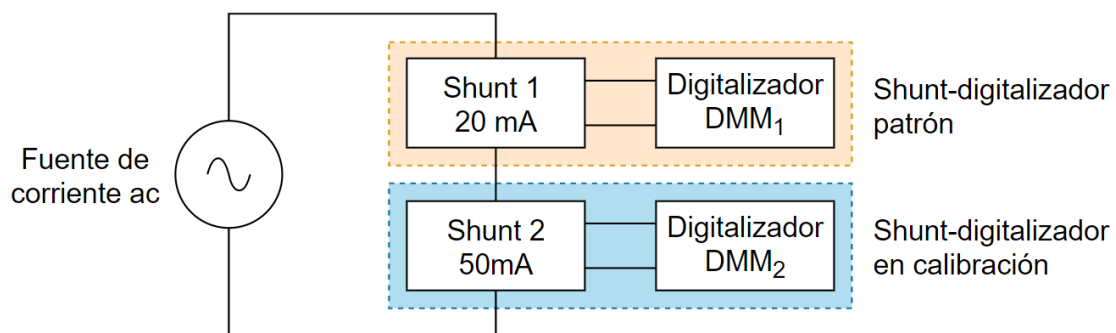
La comparación directa entre el nuevo método digital y los tradicionales métodos térmicos ha sido estudiada anteriormente mostrando un alto grado de equivalencia entre ambos métodos, con un desempeño adecuado para corrientes de hasta 1 A y frecuencias de hasta 1 kHz [3]. Se prevé que la corriente pueda ser escalada hasta 100 A sin grandes cambios en la incertidumbre, sin embargo, para frecuencias mayores la incertidumbre si se vería incrementada.

En este artículo se describe de forma detallada el nuevo método digital, se incluye un ejemplo con señales complejas y se validan los resultados de la escalación de forma independiente, utilizando un voltímetro cuántico (AC-QVM). Los prometedoros resultados presentados permitirán no sólo la calibración digital de señales complejas, sino el ahorro de tiempo y costes en el establecimiento de las cadenas de trazabilidad en ac.

## 2. DESARROLLO/DESCRIPCIÓN

Como paso previo a la escalación de intensidades en ac, los digitalizadores tienen que ser caracterizados frente a un patrón de tensión Josephson (JVS). Los digitalizadores operarán de esta manera en un rango calibrado cuánticamente y se usarían los shunts para extender la escala de valores medidos estando trazados directamente al patrón cuántico.

En el nuevo método digital, la escalación se realiza sustituyendo los convertidores térmicos por digitalizadores de alta gama. La configuración resultante se muestra en la **Fig. 1**, donde un generador de corriente suministra la misma corriente a dos combinaciones shunt-digitalizador conectadas en serie: el shunt-digitalizador patrón y el shunt-digitalizador en calibración. Cada shunt se conecta con su correspondiente digitalizador en paralelo.



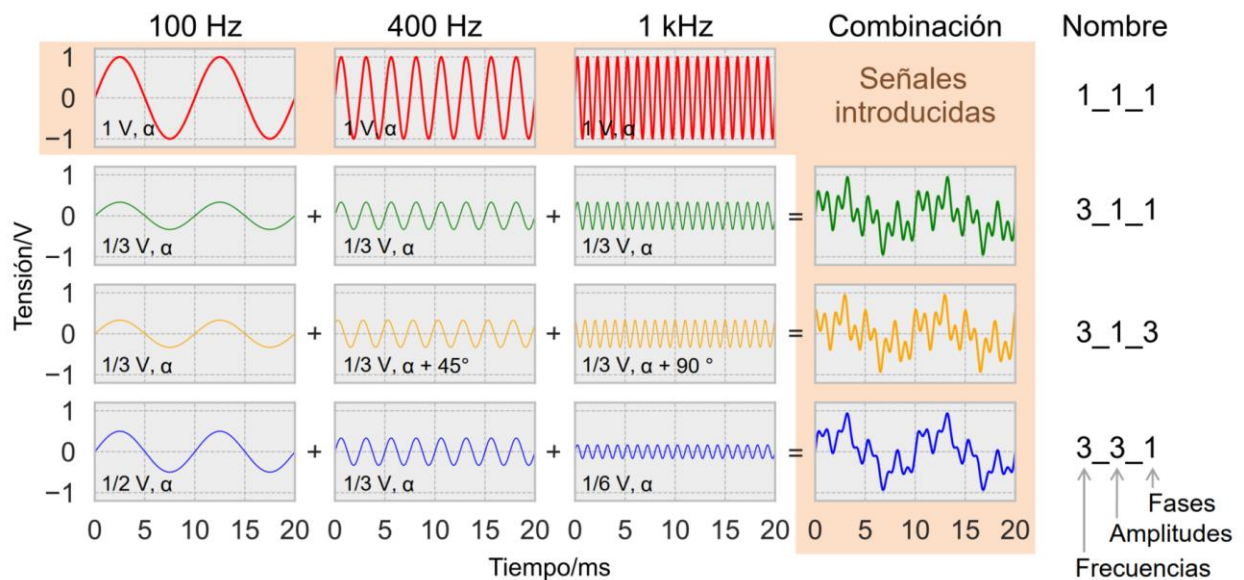
**Figura 1: Configuración de escalación de corriente en ac.**

De esta manera, al conocer la corrección del shunt-digitalizador patrón, ya que se ha caracterizado por medio de un JVS, y comparando las respuestas de los digitalizadores, se puede obtener la corrección del shunt-digitalizador en calibración. Si este método se repite para intensidades más altas utilizando los shunts apropiados, se puede establecer una cadena completa de trazabilidad digital de intensidad de corriente en ac.

Para comprobar que la respuesta de la nueva cadena de trazabilidad ante señales complejas es adecuada, se han sido generados dos tipos de señales según el número de frecuencias que portan: señales monotonas y señales multitonas, siendo las señales multitonas una combinación de señales monotonas de 100 Hz, 400 Hz y 1 kHz. En total se han considerado tres tipos de combinaciones multitonas:

1. misma amplitud/misma fase,
2. misma amplitud/diferente fase y
3. diferente amplitud/misma fase.

La **Fig. 2** muestra en la primera fila las señales monotono generadas, y en las filas 2-4 las señales monotono que son combinadas y cuya resultante es la onda multitono introducida en la configuración digital (cuarta columna de la **Fig. 2**). En total, se han generado señales de cuatro formas distintas denominándose a cada una de ellas como  $a\_b\_c$ , donde  $a$  indica el número de señales introducidas a la misma vez (frecuencias),  $b$  el número de amplitudes y  $c$  el número de fases.



**Figura 2: Señales generadas e introducidas en la configuración digital.**

En cuanto al equipamiento utilizado en este trabajo, se han usado dos multímetros Keysight 3458A como digitalizadores (denominados  $DMM_1$  y  $DMM_2$ ) junto con dos shunts de ac SP CS3A, desarrollados por el INM sueco (actual RISE), de intensidades nominales 20 mA y 50 mA, respectivamente. En cuanto a la fuente de corriente en ac se han utilizado; como JVS, un JAWS (sintetizador de onda arbitraria Josephson) desarrollado por el INM alemán (PTB), utilizado en modo monotono y multitono; como fuente monotono, un calibrador Fluke 5720A y; como fuente monotono y multitono, un amplificador de audio Audio Precision APX55.

Los digitalizadores han sido configurados para tomar muestras en dc (denominado modo DCV) ya que es el modo de muestreo más exacto, con un tiempo de apertura de 120  $\mu$ s. El software Vatron, desarrollado internamente en el CEM, ha sido utilizado para analizar y procesar los datos y para calcular las amplitudes de cada componente individual de las señales monotono y multitono resultantes, mediante un ajuste sinusoidal de cuatro parámetros [4].

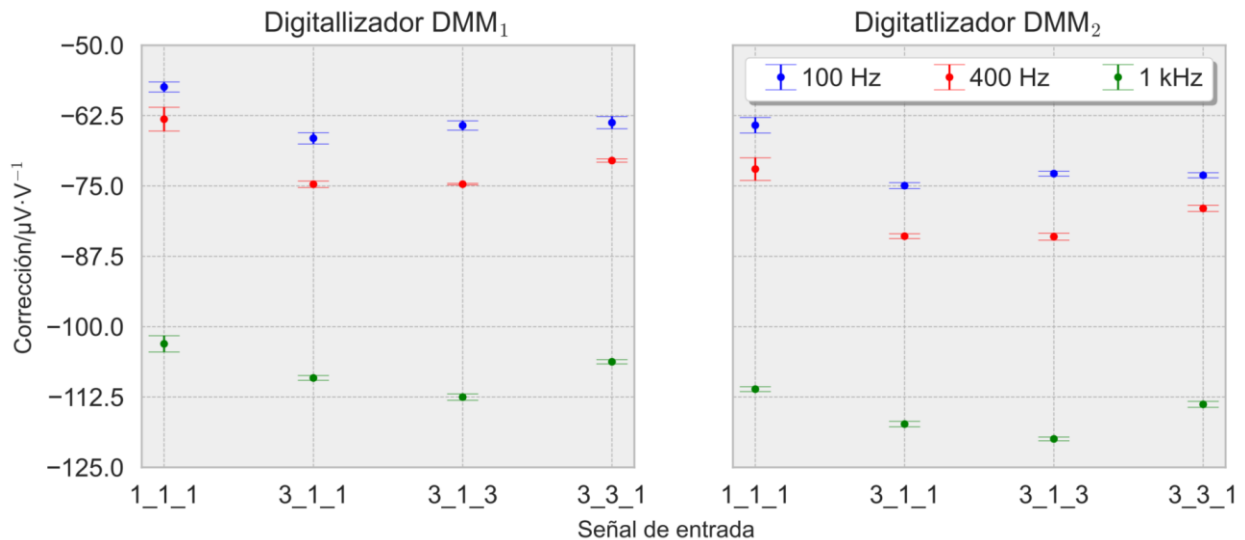
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los multímetros  $DMM_1$  y  $DMM_2$  fueron calibrados cuánticamente frente al JAWS, introduciendo las señales mostradas en la primera fila y cuarta columna de la **Fig. 2**. De esta manera se han calculado las correcciones, definidas como la diferencia entre la amplitud nominal establecida en el JAWS y la amplitud calculada por el software Vatron, para cada componente de frecuencia.

En la **Fig. 3** se muestran las correcciones calculadas para cada uno de los digitalizadores (media y desviación típica de varias medidas realizadas a lo largo de una semana) por cada una de las cuatro formas de generación de señales y clasificadas por frecuencia. En valor absoluto, se observa como las correcciones son ligeramente mayores para el digitalizador  $DMM_2$ , con las

mayores correcciones correspondiendo a 1 kHz para todas las señales. También, las señales combinadas presentan correcciones mayores, comparadas con las señales monótono.

La diferencia existente entre los valores de las correcciones demuestra que se debe caracterizar cada digitalizador dependiendo de la frecuencia y de la manera en la que las señales son generadas.



**Figura 3: Correcciones de los digitalizadores.**

Para validar los resultados de la nueva cadena de trazabilidad, se ha comparado el ratio de las resistencias de los shunts antes y después de corregir las medidas, con el ratio de las resistencias de los shunts calibradas cuánticamente con un AC-QVM [5]. La cadena de trazabilidad sería validada si el error relativo del ratio de las resistencias después de la corrección sería próximo a cero y apreciablemente menor a la diferencia antes de la corrección.

En los correspondientes cálculos se han utilizado las siguientes expresiones:

$$r_0 = \frac{U_{DMM_1}}{U_{DMM_2}} \quad (1)$$

$$r_c = \frac{U_{DMM_1}}{U_{DMM_2}} \cdot \frac{1 - c_{DMM_2}}{1 - c_{DMM_1}} \quad (2)$$

$$\delta(r) = \frac{r - r_Q}{r_Q} \cdot 10^6 \quad (3)$$

Donde  $r_0$ ,  $r_c$  y  $r_Q$  son, respectivamente, el ratio de las resistencias antes de aplicar las correcciones, después de aplicar las correcciones y calibradas cuánticamente,  $\delta(r)$  es el error relativo del ratio de las resistencias para  $r = r_0$  o  $r = r_c$ ,  $U$  es la tensión calculada a partir del muestreo digital y  $c$  representa cada corrección. El subíndice D indica el digitalizador: DMM<sub>1</sub> o DMM<sub>2</sub>.

En la **Fig. 4** se muestra el error relativo del ratio de las resistencias  $\delta(r)$  para cada tipo de señal generada. Se observa cómo, antes de la corrección, la media del error del ratio varía entre  $7 \cdot 10^{-6}$  y  $11 \cdot 10^{-6}$ . Sin embargo, después de corregir las medidas de los multímetros, la media del error del ratio se encuentra entre 0 y  $2 \cdot 10^{-6}$ . La sustancial reducción del error del ratio en una media de  $8.5 \cdot 10^{-6}$  y su proximidad a cero indica la viabilidad de la nueva cadena de trazabilidad, incluyendo el análisis de señales dinámicas.

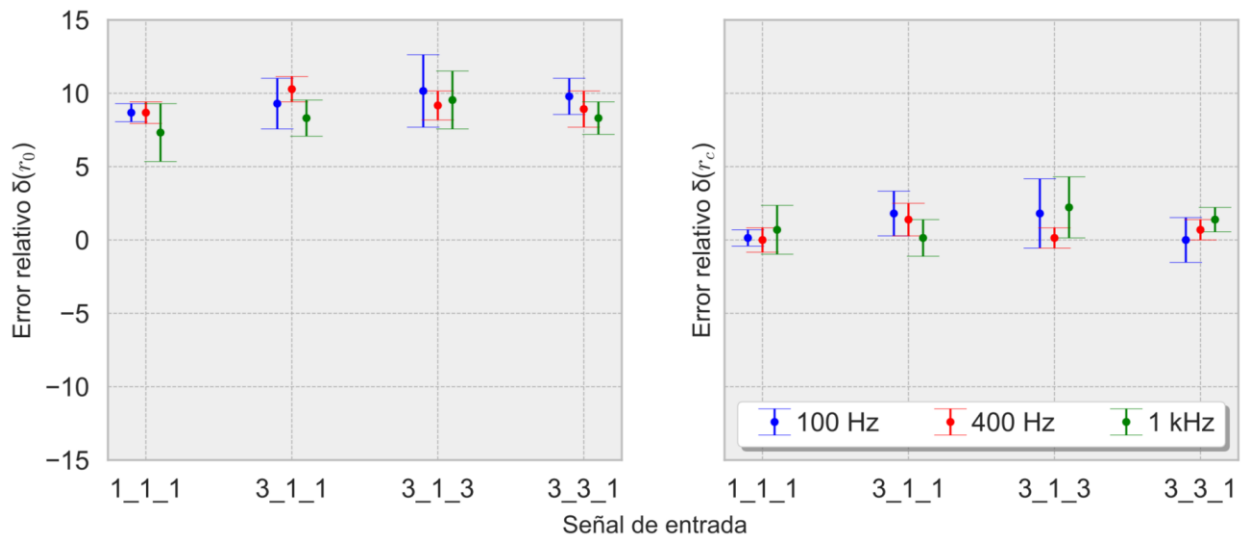


Figura 4: Error relativo del ratio de las resistencias,  $\delta(r)$ .

#### 4. CONCLUSIONES

Este artículo presenta un nuevo método para trazar al SI la intensidad de corriente en ac. Está basado en la utilización de patrones de tensión Josephson para calibrar digitalizadores de alta gama, junto a shunts de corriente. El nuevo método aporta una trazabilidad más directa al SI, proporcionando un tiempo de medida sensiblemente más corto y requiriendo de un hardware con características menos exigentes. La mayor ventaja del uso del muestreo digital es que permite la evaluación del contenido espectral de las ondas ensayadas, lo que no es posible con el uso de los tradicionales métodos térmicos. Como desventaja se puede mencionar la necesidad de mejores capacidades en el procesamiento de datos, sin embargo esta tarea puede ser automatizada.

En el método tradicional que utiliza convertidores térmicos, cada intensidad de corriente para cada frecuencia se calibra en aproximadamente 30 minutos. En el caso del nuevo método este tiempo se reduce a menos de 5 minutos, incluyendo un procesamiento de datos más complejo. Esto supone una reducción de más de seis veces, pero considerando además que la aplicación de varias frecuencias a la vez no tiene pérdida de exactitud, la potencial reducción de tiempo de calibración es mucho mayor.

El método se valida a través de medidas cuánticas con un AC-QVM, siendo el error relativo del ratio de resistencias de aproximadamente  $\pm 2 \cdot 10^{-6}$ , después de correcciones. Las correcciones digitales dependen de la frecuencia, digitalizador y de la manera que se combinan las señales de entrada. Con estas correcciones cualquier forma de onda compleja puede ser calibrada permitiendo realizar mediciones de alta precisión y exactitud en un campo en el que tradicionalmente no ha sido posible.

En resumen, la caracterización de las medidas y la investigación de la nueva cadena de trazabilidad muestra resultados muy prometedores y se espera que en un futuro se integren estos métodos digitales en las cadenas de trazabilidad de los INMs y a largo plazo replacen los métodos basados en convertidores térmicos.

## 5. REFERENCIAS

- [1] J. Ireland et al., *A method for using Josephson voltage standards for direct characterization of high performance digitizers to establish AC voltage and current traceability to SI*, submitted to Measurements, Science and Technology, 2022
- [2] EMPIR Joint Research Project 17RPT03 DIG-AC 2018 – 2022, *A digital traceability chain for AC voltage and current*, URL <https://digac.gum.gov.pl/>
- [3] D. Peral, Y.A. Sanmamed and J. Díaz de Aguilar, *Feasibility of a digital counterpart of thermal converter-based current step up*, IMEKO TC-4 September 2022 - Brescia, Italy.
- [4] J.R. Salinas, J.D. de Aguilar, F. García-Lagos, G. Joya, F. Sandoval and M.L. Romero, *Spectrum analysis of asynchronously sampled signals by means of an ANN method*, 29th Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), 2014, pp. 422-423, doi: 10.1109/CPEM.2014.6898439.
- [5] D. Peral, R. Behr, D. Ilić, O. Kieler, J. Herick, Y.A. Sanmamed, L. Palafox and J. Díaz de Aguilar, *Quantum validation of digital step up of shunts*, submitted to CPEM 2022 - Wellington, New Zealand

## 6. AGRADECIMIENTOS

El proyecto 17RPT03 DIG-AC recibe fondos del programa EMPIR, cofinanciado por los estados participantes y el programa de investigación e innovación de la Unión Europea, Horizonte 2020.